

Применимость упругих элементов в задаче расслоения трансверсально-составного криогенного бака

© А.В. Егоров, Ф.Ал. Васильев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Задача расслоения решается на основе конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния цилиндрического криогенного бака, усиленного внешней упругой сеткой. Считается, что бак состоит из двух слоев: внутреннего несущего — металлического и наружного теплоизоляционного — пенопластового. В процессе захлаживания бака между слоями возникает нежелательный зазор, который предлагается устранять с помощью натянутой поверх пенопласта упругой сетки. Оценка толщины зазора и необходимой силы натяжения осуществляется путем сравнения результатов двух расчетов: без сетки и при ее наличии. Учитывая осесимметричность конструкции бака, в качестве расчетной схемы выбрано трансверсально-составное тонкостенное кольцо, имитирующее центральную цилиндрическую часть бака. В качестве нагрузок выступает температура, которая охлаждает во времени внутреннюю поверхность металлического кольца от нормального значения до криогенного, при этом внешняя поверхность пенопластового кольца не охлаждается. На внутреннюю поверхность металлического кольца действует постоянное давление наддува. Построенный таким образом представительный элемент криогенного бака имеет уменьшенный диаметр при сохранении исходных толщин слоев бака. Расчеты представительного элемента выполнены в программном комплексе ANSYS.

Ключевые слова: криогенный ракетный бак, захлаживание, напряженно-деформированное состояние, контактная задача, контакт с односторонней связью, метод конечных элементов, прижимная упругая сетка

Введение. В настоящее время тенденция моделирования и проведения расчетов различных физических процессов, встречающихся в инженерной практике, переходит в конечно-элементные программные комплексы [1]. Это позволяет выполнять вычисления задач при сложной геометрии объектов и самых разных силовых факторах. В качестве верификации результатов расчета задачи используются приближенные аналитические решения или численные решения более простых задач.

В данной статье описан подход к решению контактной нестационарной задачи методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Суть ее заключается в рассмотрении нестационарного напряженно-деформированного состояния криогенного цилиндрического бака в процессе захлаживания, а также в решении вопроса о необходимости применения дополнительных упругих прижимающих элементов для недопущения потери контакта между слоями [2].

Исследуются тепловые режимы и напряженно-деформированное состояние в процессе захлаживания. В частности, определяется возможность появления в трансверсально-составной конструкции криогенного бака нежелательных отслоений (воздушных зазоров) между несущей металлической оболочкой и слоем теплоизоляционного покрытия. Предлагаемое исследование направлено на установление факта расслоения и обоснование применимости внешних упругих элементов для создания сжимающего давления, которое обеспечит сохранение устойчивого контакта слоев без образования зазора.

Для уменьшения расчетного времени в качестве объекта исследования был рассмотрен представительный элемент криогенного бака — трансверсально-составное кольцо уменьшенного диаметра. Предполагаются два слоя: силовой металлический слой и слой теплоизоляционного покрытия [3]. Между этими слоями задается идеальный контакт с односторонней связью без трения [4]. Захлаживание имитируется посредством задания линейно уменьшающейся во времени температуры на внутренней поверхности металлического кольца.

Решение контактной задачи трансверсально-составного кольца объединяет два временных процесса: определение поля температур и оценку напряженно-деформированного состояния. Расчет напряженно-деформированного состояния такого кольца проводится с учетом внутреннего давления наддува и зависимости механических характеристик материалов от температуры. Согласно найденному напряженно-деформированному состоянию трансверсально-составного кольца определяется статус контакта слоев и контактное давление.

Цель работы — через изучение напряженно-деформированного состояния представительного элемента оценить возможность возникновения расслоений в трансверсально-составном криогенном баке и эффективность применения упругих элементов для сохранения монолитности конструкции.

Постановка задачи. В настоящее время в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева ведется разработка кислородно-водородного разгонного блока (КВТК), который содержит бак с жидким водородом [5]. Использование предлагаемого оценочного решения задачи расслоения может быть полезным для сокращения объема наземных испытаний, в ходе которых необходимо захлаживать бак до температуры жидкого водорода, что является трудозатратным и дорогостоящим процессом.

Схема представительного элемента криогенного бака — трансверсально-составного кольца шириной 20 мм показана на рис. 1, трехмерная модель представительного элемента — на рис. 2.

Контакт с односторонней связью
Термическое контактное
сопротивление $1/3000 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$

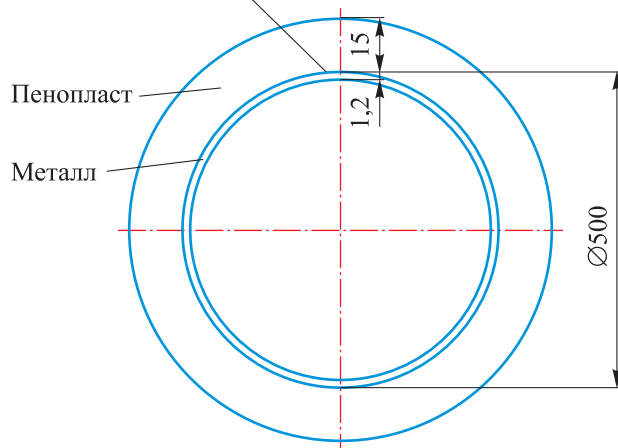


Рис. 1. Схема представительного элемента криогенного цилиндрического бака — трансверсально-составного кольца

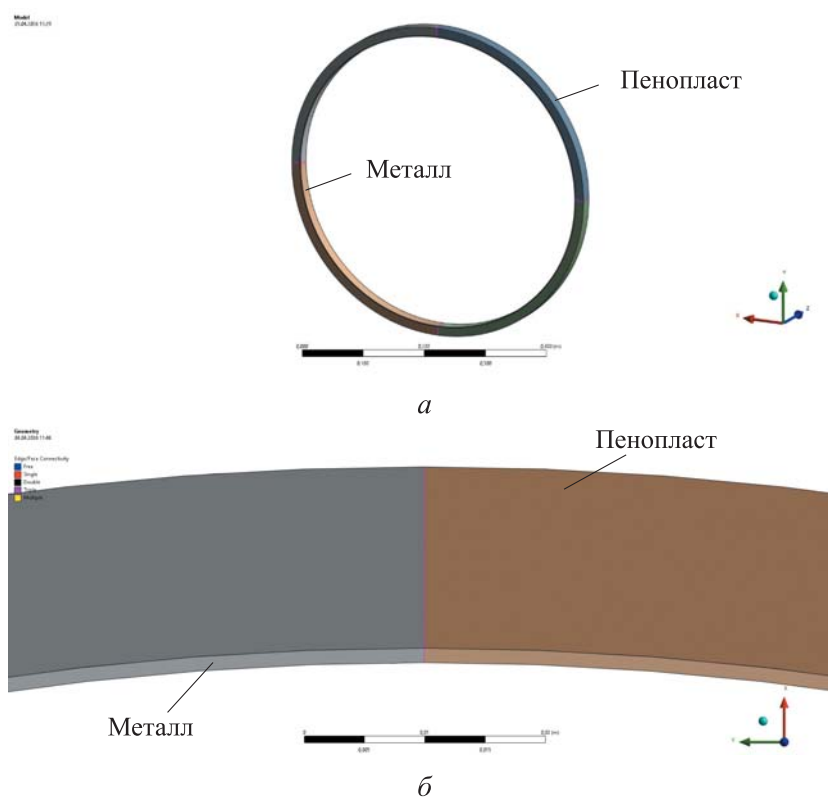


Рис. 2. Трехмерная модель представительного элемента криогенного цилиндрического бака — трансверсально-составного кольца

Считаем, что металлическое кольцо выполнено из алюминиевого термоупрочняемого сплава 1201, оно имеет внутренний диаметр 500 мм и толщину 1,2 мм. Основные прочностные характеристики сплава, принятые для расчета, приведены в табл. 1 [6]. Поскольку задача может решаться как в упругой, так и в неупругой зоне, в программном комплексе были заданы диаграммы деформирования указанного сплава при разных температурах (рис. 3, 4) [7].

Таблица 1

**Механические характеристики алюминиевого сплава 1201
при различных значениях температуры**

Температура T , К	Модуль упругости E , ГПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Предельное удлинение δ , %
20	78,8	460	650	11,5
77	77,8	400	550	10,0
293	72,0	350	440	8,5

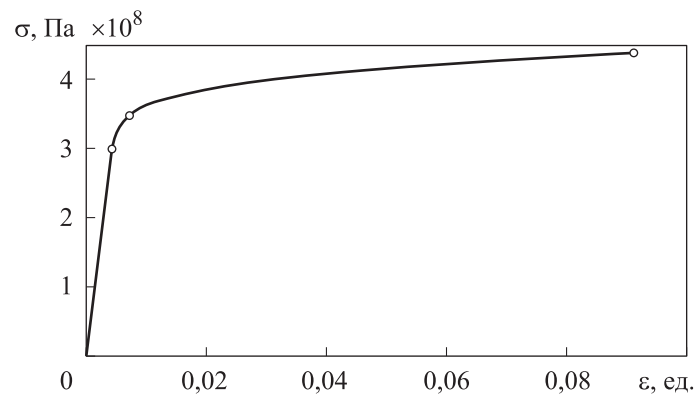


Рис. 3. Диаграмма деформирования сплава 1201
при температуре 293К (20 °C)

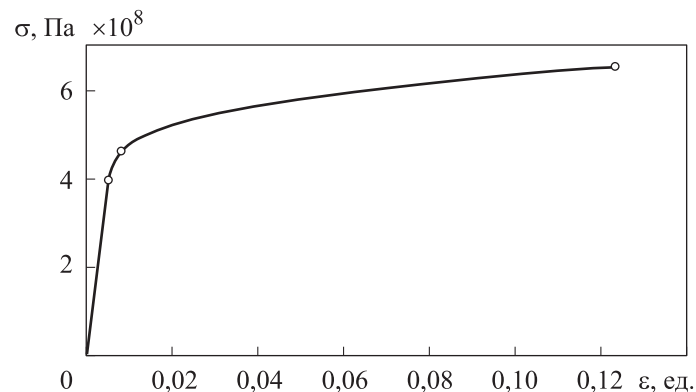


Рис. 4. Диаграмма деформирования сплава 1201
при температуре 20К (-253 °C)

Слой теплоизоляционного покрытия толщиной 15 мм, выполненный из пенополиуретанового пенопласта типа Изолан, расположен поверх металлического кольца [3]. Физические характеристики пенопласта [8] и алюминиевого сплава 1201, принятые для проведения расчета, представлены в табл. 2. Модуль упругости первого рода пенопласта был задан равным 1,8 МПа [8].

Таблица 2

Физические характеристики пенопласта типа Изолан и алюминиевого сплава 1201 для проведения конечно-элементного расчета

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)
Пенопласт	50	0,025	1650
Алюминиевый сплав 1201	2850	130	900

Немаловажным фактором, оказывающим влияние на результаты, является грамотный выбор схемы закрепления расчетной модели. В данной задаче необходимо ограничить трансверсально-составное кольцо от поступательного и вращательного движения как жесткого целого. При этом следует разрешить деформирование слоев в радиальном направлении ввиду термических нагрузок. Поскольку задача осесимметричная, термические деформации будут возникать только в радиальном направлении, поэтому была выбрана следующая схема закрепления (рис. 5):

- в верхней и нижней точке металлического кольца разрешается перемещение в направлении оси y ;
- в левой точке металлического кольца разрешается перемещение в направлении оси x ;
- в трех показанных точках запрещается перемещение вдоль оси z (вдоль оси кольца).

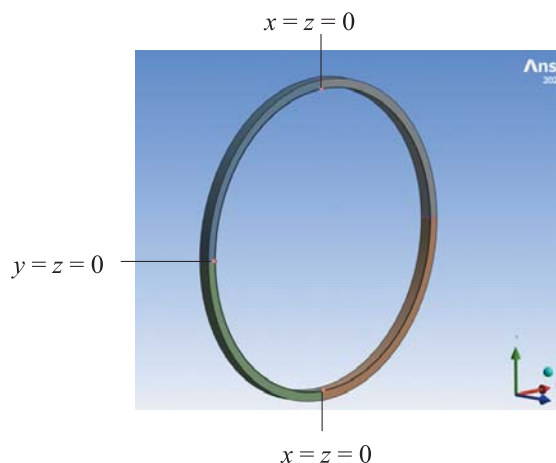
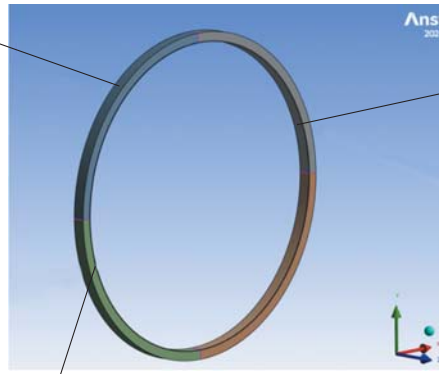


Рис. 5. Схема закрепления трансверсально-составного кольца

Конвективный теплообмен

$$T_{\text{среды}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$



$$T(t) = 293 \text{ при } 0 < t < 200$$

$$T(t) = 293 - 273/6600t$$

$$\text{при } 200 < t < 6800$$

$$p = \text{const} = 0,3 \text{ МПа}$$

Контактное термическое сопротивление

$$R = 1/3000 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$$

Рис. 6. Схема приложенных нагрузок трансверсально-составного кольца

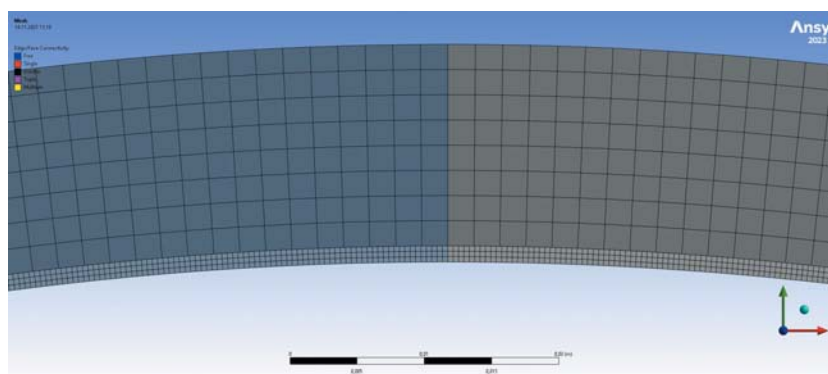
Схема нагружения связана с захлаживанием бака, т. е. с охлаждением внутренней металлической оболочки до температуры криогенного топлива, и с внутренним давлением наддува во избежание потери устойчивости металлической оболочки. Заданы следующие нагрузки, действующие на трансверсально-составное кольцо (рис. 6):

- постоянное внутреннее давление наддува, равное 0,3 МПа [9], действующее на внутреннюю поверхность металлического кольца в течение всего времени захлаживания;
- изменение температуры внутренней металлической поверхности: в течение первых 200 секунд температура постоянна и равна 293К, затем она линейно снижается до 20К в течение 6600 с [10];
- внешняя поверхность пенопласта имеет конвективный теплообмен с окружающей средой, температура которой 293К, выбран коэффициент теплоотдачи $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

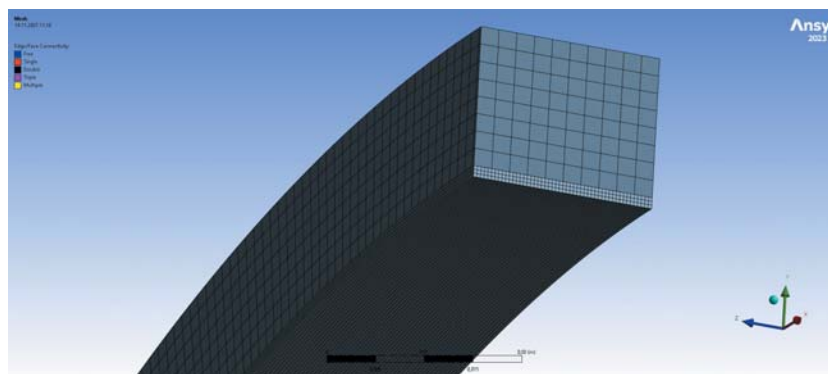
В расчетах приняты следующие допущения:

- материалы подчиняются закону Дюамеля — Неймана с коэффициентом линейного температурного расширения, не зависящим от температуры;
- тела изотропные, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости при постоянном давлении и плотности всех материалов, применяемых в конструкции, не зависят от значений температуры;
- клеевым взаимодействием между слоями металла и пенопласта пренебрегается, используется идеальный контакт с односторонней связью без трения;
- задача осесимметричная.

Конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца. Данная модель представляет собой два твердотельных кольца, имеющих между собой идеальный контакт с односторонней связью без трения (тип frictionless). В обоих слоях используется восьмиузловой твердотельный конечный элемент типа SOLID225 призматической формы. Конечный элемент такого типа позволяет исследовать сразу несколько процессов различной физической природы, в частности, теплопроводность совместно с анализом напряженно-деформированного состояния [11]. Поскольку толщина металлического кольца меньше, чем кольца из пенопласта, размер конечных элементов металлического кольца был задан меньше, чем пенопластовых (рис. 7). В исследовании задачи без упругой сетки суммарное число конечных элементов составило 655830, а суммарное число узлов — 883932.



а



б

Рис. 7. Конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца:
а — вид сбоку; б — вид в проекции

Анализ результатов расчета. В результате проведенных исследований получены все параметры напряженно-деформированного состояния: температура, контактное давление и статус контакта в течение всего временного интервала приложения нагрузок. В момент

времени примерно на 2450-й секунде контакт между слоями нарушается по всей длине окружности. Эпюры интенсивности деформаций, эквивалентных напряжений и поля распределения температуры в трансверсально-составном кольце при захлаживании в различные моменты времени представлены на рис. 8, 9, 10 соответственно.

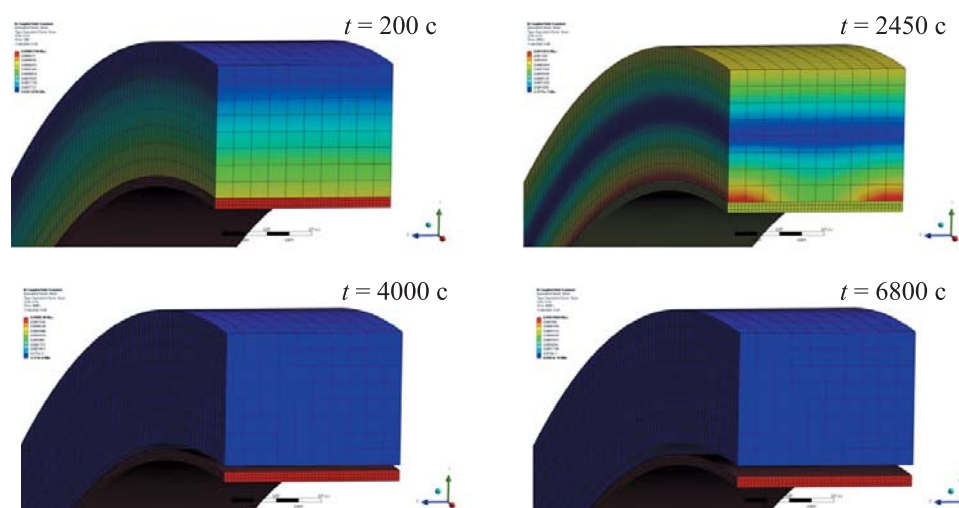


Рис. 8. Эпюры распределения интенсивности деформаций в трансверсально-составном кольце при захлаживании в различные моменты времени

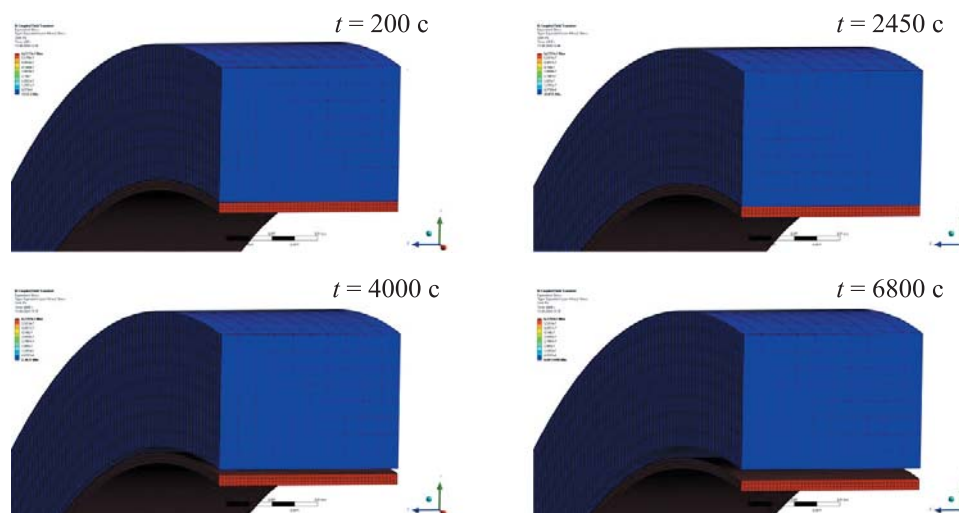


Рис. 9. Эпюры распределения эквивалентных напряжений в трансверсально-составном кольце при захлаживании в различные моменты времени

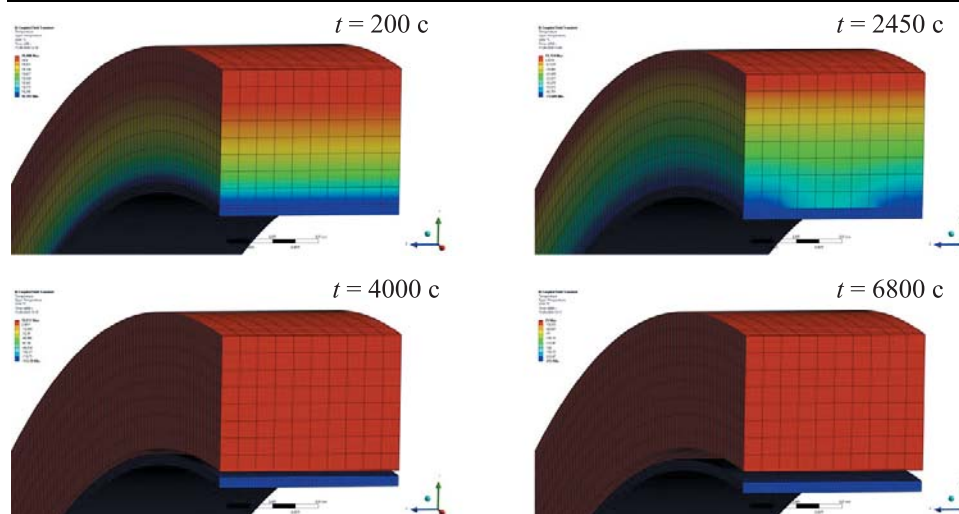


Рис. 10. Эпюры распределения температуры в трансверсально-составном кольце при захлаживании в различные моменты времени

Значения контактного давления по ширине кольца — в его середине и на краях — при захлаживании в разные моменты времени представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения контактного давления трансверсально-составного кольца при захлаживании в различные моменты времени

Контактное давление по ширине кольца	Значение давления, Па, в момент времени, с					
	200-я	1000-я	2450-я	4000-я	6120-я	6800-я
$P_{\text{лев край}}$	83,236	70,951	24,389	0	0	0
$P_{\text{прав край}}$	83,236	70,872	23,756	0	0	0
$P_{\text{середина}}$	82,688	48,72	0	0	0	0

Тела деформируются совместно до момента потери контакта. Характеристика наличия контакта — ненулевое значение контактного давления. Как только контактное давление в какой-либо окрестности составной конструкции принимает нулевое значение, в ней происходит отрыв одного слоя от другого. В результате расчета было получено напряженно-деформированное состояние кольца в зависимости от времени захлаживания. В момент времени около 2450-й секунды происходит разрыв контакта — отслоение (см. рис. 10). В рассмотренной задаче потеря контакта (расслоение) трансверсально-составного кольца возникает по той причине, что в конкретный момент времени процесса захлаживания термические сжимающие

деформации начинают превышать деформации, вызванные растяжением в радиальном направлении от внутреннего давления 0,3 МПа.

После потери контакта пенопласт с большой скоростью прогревается и термически расширяется, вследствие чего повторного контакта уже не образуется и два тела деформируются независимо друг от друга.

Модель трансверсально-составного кольца с учетом прижимной упругой сетки. Для того чтобы не допустить расслоение трансверсально-составного кольца, целесообразно использовать упругие прижимные элементы, которые за счет давления будут удерживать контакт. В качестве конструктивного решения была принята композитная упругая сетка на основе стекловолокна со связующим [2]. Ставится задача определить минимальное прижимное давление, вызванное натягом упругой сетки, при котором не будет наблюдаться расслоение конструкции в течение всего времени захлаживания.

В качестве представительного элемента с упругой прижимной сеткой рассматривается трансверсально-составное кольцо, на внешнюю поверхность которого посередине воздействует прижимное давление (рис. 11). Конечно-элементная модель имеет тот же тип конечных элементов и такой же идеальный контакт с односторонней связью без трения. Введенные ранее допущения, система закрепления и приложенные нагрузки приняты идентичными тем, которые использовались при расчете без прижимной упругой сетки.

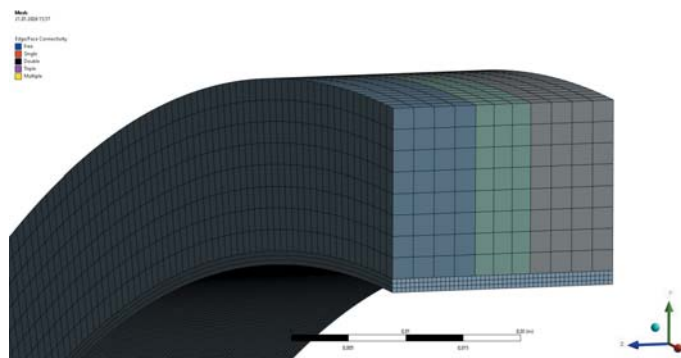


Рис. 11. Конечно-элементная модель трансверсально-составного кольца с учетом воздействия прижимной упругой сетки

Анализ полученных результатов расчета трансверсально-составного кольца с учетом прижимной упругой сетки. Результаты расчетов показали, что при значении прижимного давления 500 Па расслоение отмечается в момент времени около 6120-й секунды, а при значении прижимного давления 700 Па расслоения трансверсально-

составной конструкции не происходит. Для модели с упругой сеткой с прижимным давлением 700 Па эпюры интенсивности деформаций, эквивалентных напряжений и поля распределения температуры при захлаживании в различные моменты времени представлены на рис. 12, 13, 14 соответственно.

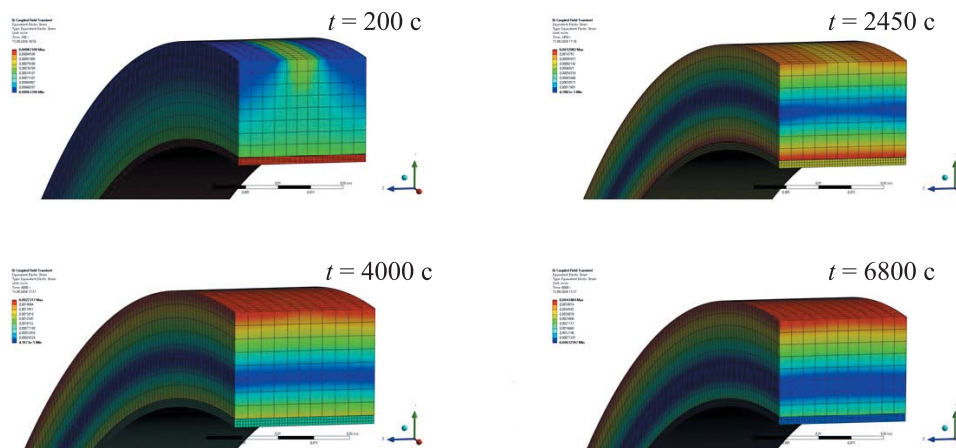


Рис. 12. Распределение интенсивности деформаций в трансверсально-составном кольце с учетом упругой прижимной сетки с прижимным давлением 700 Па при захлаживании в различные моменты времени

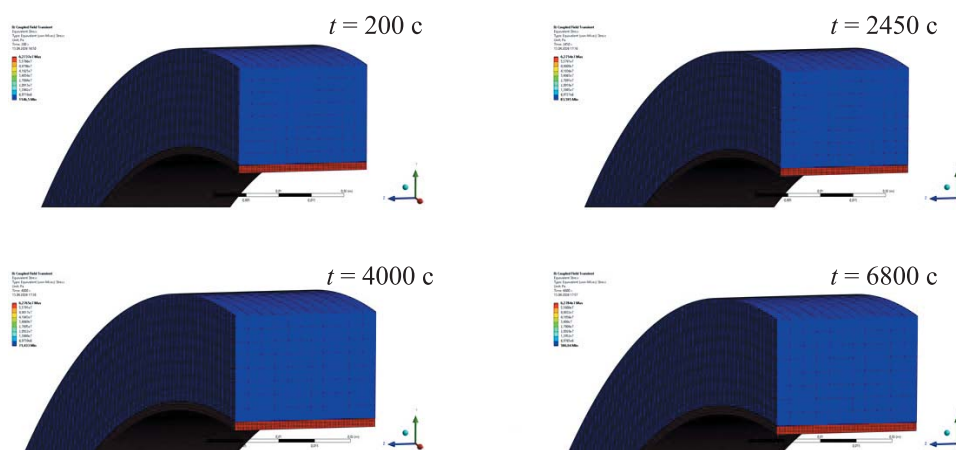


Рис. 13. Распределение эквивалентных напряжений в трансверсально-составном кольце с учетом упругой прижимной сетки прижимным давлением 700 Па при захлаживании в различные моменты времени

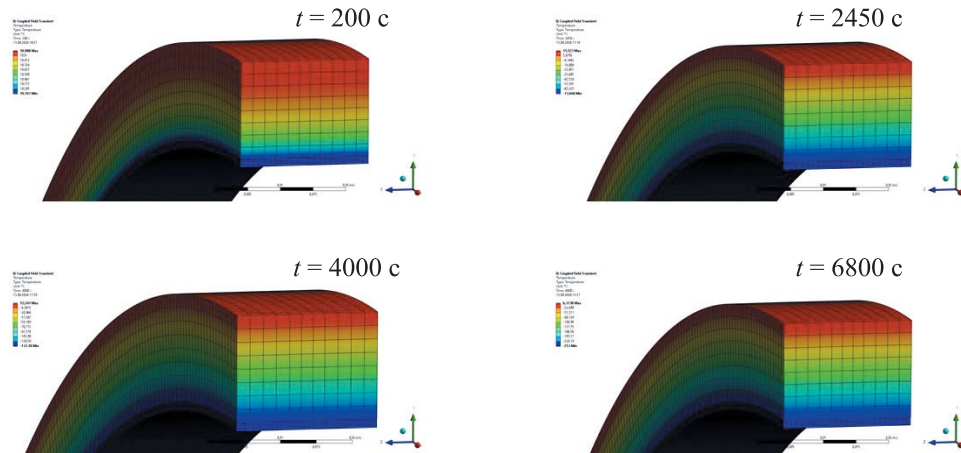


Рис. 14. Распределение температуры в трансверсально-составном кольце с учетом упругой прижимной сетки прижимным давлением 700 Па при захлаживании в различные моменты времени

Значения контактного давления при захлаживании в различные моменты времени с учетом прижимного давления 500 Па и 700 Па приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения контактного давления по ширине кольца — в середине и на краях — при захлаживании в различные моменты времени с учетом прижимного давления

Контактное давление, Па, по ширине кольца	Значение давления, Па, в момент времени, с					
	200-я	1000-я	2450-я	4000-я	6120-я	6800-я
Прижимное давление 500 Па						
$P_{\text{лев край}}$	197,18	180,06	153,04	124,71	73,08	0
$P_{\text{прав край}}$	197,18	180,0	152,7	123,74	72,92	0
$P_{\text{середина}}$	197,83	1168,22	118,96	66,381	0	0
Прижимное давление 700 Па						
$P_{\text{лев край}}$	252,84	239,81	220,37	199,68	171,77	162,83
$P_{\text{прав край}}$	252,84	239,81	220,37	199,68	171,77	162,83
$P_{\text{середина}}$	254,51	221,3	165,65	106,25	25,403	0,303

Согласно полученным результатам, при использовании упругой прижимной сетки из композитных материалов с постоянным сжимающим давлением 700 Па расслоения трансверсально-составной конструкции не возникает, оба тела деформируются совместно в течение всего времени захлаживания. При этом увеличенное значение контактного давления по краям характеризует наличие краевых эффектов

ввиду термических деформаций пенопласта на торцах. Это возникает в связи с тем, что в данной модели не предусматривалось наложение граничных условий по торцам слоя из пенопласта.

Распределение температуры по толщине пенопласта принимает высокий градиент — от 20К и практически до 293К. В окрестности прилегания упругой сетки в слое пенопласта возникает локальное увеличение значения интенсивности деформации, при этом эквивалентные напряжения в пенопласте не превышают предела прочности.

Аналитический расчет требуемого прижимного давления.

Для вычисления значения требуемого контактного давления, не допускающего расслоения трансверсально-составной конструкции, необходимо рассчитать радиальные перемещения каждого слоя. Определив максимально возможный образовавшийся радиальный зазор между слоями, можно оценить требуемое прижимное давление, сдавливающее пенопласт [12].

Определим радиальные деформации металлического кольца ($\epsilon_{\text{ме}}$) при давлении $p = 0,3$ МПа по формуле

$$\epsilon_{\text{ме}} = \frac{pR_{\text{ме}}}{\delta_{\text{ме}}E_{\text{ме}}} - \alpha_{\text{ме}}\Delta T_{\text{ме}} = -4,665 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ме}}$ — радиус средней линии металлического кольца; p — внутреннее давление; $\delta_{\text{ме}}$ — толщина металлического кольца; $E_{\text{ме}}$ — модуль упругости первого рода алюминиевого сплава 1201 при температуре 20К; $\alpha_{\text{ме}}$ — коэффициент линейного теплового расширения металлического кольца; $\Delta T_{\text{ме}}$ — изменение осредненной температуры по сечению металлического кольца.

Радиальные перемещения металлического кольца вычислим как произведение

$$u_{\text{ме}} = \epsilon_{\text{ме}}R_{\text{ме}} = -1,169 \text{ мм.} \quad (2)$$

Приняв, что слой пенопласта деформируется от взаимодействия с металлическим кольцом в результате действия на него внутреннего давления, а также от понижения температуры средней линии пенопласта до осредненной по толщине слоя пенопласта температуры (156,5К), рассчитаем значение радиальных деформаций кольца из пенопласта:

$$\epsilon_{\text{пп}} = \frac{pR_{\text{ме}}}{\delta_{\text{ме}}E_{\text{ме}}} - \alpha_{\text{пп}}\Delta T_{\text{пп}} = -3,117 \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{пп}}$ — коэффициент линейного теплового расширения пенопласта; $\Delta T_{\text{пп}}$ — изменение осредненной температуры по сечению пенопласта (с 293К до 156,5К).

Перемещения средней линии кольца из пенопласта будут

$$u_{\text{пп}} = \varepsilon_{\text{пп}} R_{\text{пп}} = -0,783 \text{ мм}, \quad (4)$$

где $R_{\text{пп}}$ — радиус средней линии кольца из пенопласта.

Возникающий в процессе захлаживания зазор будет определен следующим образом:

$$\Delta = |u_{\text{ме}} - u_{\text{пп}}| = 0,386 \text{ мм}. \quad (5)$$

Тогда требуемое прижимное давление для предотвращения возникновения данного зазора можно найти по формуле

$$p_{\text{сж}} = \delta_{\text{пп}} \frac{\Delta}{R_{\text{пп}}^2} E_{\text{пп}} = 165,134 \text{ Па}, \quad (6)$$

где $\delta_{\text{пп}}$ — толщина слоя пенопласта; $E_{\text{пп}}$ — модуль упругости первого рода пенопласта.

Поскольку упругая прижимная сетка действует не на всю внешнюю поверхность пенопласта, а по площади прилегания нитей сетки, ширина которой принята равной 5 мм, необходимо найденное по формуле (6) прижимное давление умножить на отношение площадей:

$$p_{\text{сж сетки}} = p_{\text{сж}} \frac{S_{\text{пп}}}{S_{\text{сетки}}} = p_{\text{сж}} \frac{20}{5} = 660,536 \text{ Па}. \quad (7)$$

Значение, полученное в (7), близко значению, рассчитанному конечно-элементным методом, которое равно 700 Па. Относительная погрешность между этими значениями составила 5,98 %. Следует отметить, что приведенный аналитический расчет является приближенным, так как он не учитывает значительный градиент температур по толщине слоя пенопласта, а лишь опирается на осредненное значение.

Заключение. Конечно-элементный анализ кольцевого представительного элемента криогенного бака показал, что в процессе захлаживания, которое длится до 6800-й секунды, в момент времени 2450-й секунды начинается расслоение двухслойной стенки бака. Возникающий зазор между несущим металлическим и теплоизоляционным пенопластовым слоями снижает эффективность теплозащиты криогенного бака. Применение специальной упругой сетки на внешней поверхности пенопласта при определенном давлении сохраняет контакт между слоями металла и пенопласта. В частности, установлено, что при внешнем давлении 500 Па зазор появляется, а при внешнем давлении 700 Па зазор не образуется. Таким образом, было установлено, что использование упругих элементов в конструкции

криогенного бака повышает эффективность его теплозащиты. Предложенный подход является оценочным, его можно использовать при построении более сложных расчетных схем подобных трансверсально-составных тонкостенных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Игнатьев А.В. *Развитие метода конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики: дис. ... д-ра техн. наук*: 05.23.17. Волгоград, 2019, 294 с.
- [2] Орлов В.Г., Щербакова Т.Н., Телегин С.В., Мальков В.В., Александров Н.Г. *Пакет тепловой изоляции и способ его изготовления*. Пат. №2459743 С1, Российская Федерация, 2012, бюл. № 24, 7 с.
- [3] Залетаев С.В., Копяткевич Р.М. Программный комплекс теплового проектирования и анализа тепловых режимов космических аппаратов. *Космонавтика и ракетостроение*, 2014, № 4 (77), с. 84–91.
- [4] Попов А.Н. Моделирование конструктивно-нелинейных контактных задач в программном комплексе ANSYS. *Форум молодежной науки*, 2021, вып. 2, № 2, с. 4–10.
- [5] Описание разрабатываемого кислородно-водородного разгонного блока. *Центр Хруничева*. URL: <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=52> (дата обращения: 26.02.2026).
- [6] Мишин В.П., Карраск В.К., ред. *Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1991, 416 с.
- [7] Каблов Е.Н. *Конструкционные композиционные материалы*. Москва, ФГУП ВИАМ, 2012, 58 с.
- [8] Щербакова Т.Н., Сереженкова В.В., Яншин Х.Я., Кудряшова Н.В., Савватеева О.А. *Многослойное изделие и способ его изготовления (варианты)*. Пат. №2298480, Российская Федерация, 2007, бюл. №13, 9 с.
- [9] Описание конструкции и эксплуатации блока Ц РН «Энергия». *Бурани*. URL: <http://www.buran.ru/htm/15-3.htm> (дата обращения: 21.02.2026).
- [10] Касымов У.Т., Толебай С.А., Берик М.Б. Система заправки ракеты-носителя с трехкомпонентными жидкостными ракетными двигателями. *IV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, преподавателей «Прикладные вопросы точных наук». 13–14 ноября*, Армавир, Армавирский государственный педагогический университет, 2020, с. 51–54.
- [11] Басов К.А. *ANSYS в примерах и задачах*. Москва, КомпьютерПресс, 2002, 224 с.
- [12] Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. *Строительная механика ракет*. Москва, Высшая школа, 1984, 391 с.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров А.В., Васильев Ф.А. Применимость упругих элементов в задаче расслоения трансверсально-составного криогенного бака. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 7. EDN JE0BTJ

Егоров Антон Витальевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: antegor177@mail.ru

Васильев Федор Алексеевич — аспирант кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: Fedorxx@inbox.ru

Applicability of Elastic Elements in the Problem of Stratification of a Transversely Composite Cryogenic Tank

© A.V. Egorov, F.A. Vasiliev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The delamination problem is solved based on a finite-element analysis of the stress-strain state of a cylindrical cryogenic tank reinforced with an external elastic mesh. It is assumed that the tank consists of two layers. The inner supporting layer is made of metal, while the outer thermal insulation layer is made of foam. During the cooling process, an undesirable gap forms between the layers, and this is proposed to be eliminated by using a stretched elastic mesh. The gap and the required tension force are evaluated by comparing the results of two calculations: one without the mesh and the other with the mesh. Given the axial symmetry of the tank design, a transversely composite thin-walled ring is chosen as the calculation scheme, which simulates the central cylindrical part of the tank. The loads are represented by the temperature, which cools the inner surface of the metal ring from a normal value to a cryogenic value over time, while the outer surface of the foam ring remains uncooled.

Keywords: cryogenic rocket tank, chilldown, stress-strain state, contact problem, one-way contact, finite element method, clamping elastic mesh

REFERENCES

- [1] Ignatyev A.V. *Razvitie metoda konechnykh elementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda stroitel'noy mekhaniki: Dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.17* [Development of the finite element method in the form of the classical mixed method of structural mechanics: Diss. ... Dr. Sc. (Engineering): 05.23.17]. Volgograd, 2019, 294 p.
- [2] Orlov V.G., Scherbakova T.N., Telegin S.V., Malkov V.V., Aleksandrov N.G. *Paket teplovoy izolyatsii i sposob ego izgotovleniya* [Thermal insulation package and method of its manufacturing]. Pat. No. 2459743 C1, Russian Federation, 2012, Bull. no. 24, 7 p.
- [3] Zaletayev S.V., Kopyatkevich R.M. Programmnyy kompleks teplovogo proektirovaniya i analiza teplovykh rezhimov kosmicheskikh apparatov [Software complex for thermal design and analysis of thermal regimes of spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2014, no. 4 (77), pp. 84–91.
- [4] Popov A.N. Modelirovanie konstruktivno-nelineynykh kontaktnykh zadach v programmnom komplekse ANSYS [Modeling of structural nonlinear contact problems in the ANSYS software complex]. *Forum molodezhnoy nauki*, 2021, iss. 2, no. 2, pp. 4–10.
- [5] Opisaniye razrabatyvaemogo kislorodno-vodorodnogo razgonnogo bloka [Description of the developed oxygen–hydrogen upper stage]. *Khrunichyev Space Research and Production Center*. Available at: <http://www.khrunichyev.ru/main.php?id=52> (accessed February 26, 2026).
- [6] Mishin V.P., Karrask V.K., eds. *Osnovy konstruirovaniya raket-nositeley kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of launch vehicle design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 416 p.

- [7] Kablov E.N. *Konstruksionnye kompozitsionnye materialy* [Structural composite materials]. Moscow, VIAM Publ., 2012, 58 p.
- [8] Scherbakova T.N., Serezhenkova V.V., Yanshin Kh.Ya., Kudryashova N.V., Savvateeva O.A. *Mnogosloynoe izdelie i sposob ego izgotovleniya (varianty)* [Multilayer product and method of its manufacturing (variants)]. Pat. No. 2298480, Russian Federation, 2007, Bull. no. 13, 9 p.
- [9] Opisanie konstruksii i ekspluatatsii bloka Ts RN “Energiya” [Description of the design and operation of the central unit of the Energia launch vehicle]. *Buran.ru*. Available at: <http://www.buran.ru/htm/15-3.htm> (accessed February 21, 2026).
- [10] Kasymov U.T., Tolebay S.A., Berik M.B. Sistema zapravki rakety-nositelya s trekhkomponentnymi zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami [Propellant loading system for a launch vehicle with three-component liquid rocket engines]. In: *IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov, prepodavateley “Prikladnye voprosy tochnykh nauk”* [IV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Teachers “Applied Problems of Exact Sciences”]. November 13–14, Armavir, Armavir State Pedagogical University, 2020, pp. 51–54.
- [11] Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and problems]. Moscow, KompyuterPress Publ., 2002, 224 p.
- [12] Balabukh L.I., Alfutov N.A., Usyukin V.I. *Stroitel'naya mekhanika raket* [Structural mechanics of rockets]. Moscow, HSE Publ., 1984, 391 p.

Egorov A.V., Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: antegor177@mail.ru

Vasiliev F.A., Postgraduate Student of the Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: Fedorxx@inbox.ru